

## ATM 自愈网中 VP 交换机对备用 VP 自愈算法性能的影响分析<sup>1</sup>

唐 健 雷振明\*

(国家数字交换系统工程技术研究发展中心 郑州 450002)

\*(北京邮电大学信息工程系 147 信箱 北京 100876)

**摘 要** 在 ATM 自愈网采用备用 VP 自愈算法的条件下,对 VP 交换机中几种典型的自愈功能实现方案建立了相应的排队模型并进行了大量的计算机模拟试验,详尽分析了 VP 交换机中自愈功能实现方案以及一些重要结构参数对自愈性能的影响。所用的分析方法具有普遍意义,得到的分析结果对于如何确定 VP 交换机中自愈功能实现方案、重要结构参数、备用 VP 的数目,以实现最好的自愈性能,具有指导意义。

**关键词** ATM 网, VP 交换机, 自愈算法

**中图分类号** TN913.24

### 1 引 言

在当前的电信网控制机制中,几个分布式 NE(Network Element, 例如交换机)控制的应用已被研究,其中包括“自愈”网络故障恢复技术<sup>[1-4]</sup>。所谓“自愈”,就是当一个网络故障出现时,通过 NE 内部处理和 NE 之间传递消息,寻找有足够闲余容量的迂回路由,以恢复失效的连接,不需要集中 OS(Operation System)介入,这是与传统的故障恢复技术的不同之处。自愈是灵活、迅速的,这是由于其采用并行处理、快速 NE 间消息传递以及小规模本地数据库的缘故。本文将仅限于研究基于 VP(Virtual Path)的 ATM 自愈网。

ATM 自愈网中自愈算法是依靠 VP 交换机(以下记为 VPX)分布式运作的,在自愈算法确定时,如果说链路上的闲余容量对能够恢复的带宽起决定性作用的话,VPX 对自愈时间里能够恢复的 VP 个数起决定性作用,因此,VPX 对自愈性能的影响是十分关键的,但是这方面的研究却很欠缺。在 ATM 自愈网采用备用 VP 自愈算法的条件下,文献[4]仅计算了一个信元在 VPX 中各个部分的平均等待时间,由此难以得到 VPX 对自愈速度的影响,而本文对 VPX 中几种典型的自愈功能实现方案建立了相应的排队模型,进行了大量的计算机模拟试验,详尽分析了 VPX 中自愈功能实现方案以及一些重要性能参数对自愈性能的影响。所用的分析方法具有普遍意义,得到的分析结果对于如何确定 VPX 中自愈功能实现方案、重要结构参数、备用 VP 的数目,以实现最好的自愈性能,具有指导意义。

### 2 备用 VP 自愈算法

在 ATM 网中,VP 与 STM 网中数字信道相比,有几个优势<sup>[5]</sup>,其中包括路由选择与带宽分配相互独立,于是,一条 VP 路由可以被建立而其带宽被指定为 0。在 ATM 网中目前已提出几种自愈算法<sup>[2,3]</sup>,备用 VP 自愈算法最为简单易行。备用 VP 自愈算法需要在每个常见故障发生前为每一条工作 VP 准备一条物理路由完全不同的、0 带宽的备用 VP。一旦一个常见网络故障出现,恢复节点对的下行节点通过接收 VP-AIS 或其它告警信号检

<sup>1</sup> 1997-06-28 收到, 1998-05-09 定稿  
国家自然科学基金资助课题

测到工作 VP 的失效, 于是, 沿着备用 VP 的路由, 向恢复节点的上行节点发送一个“恢复”消息, 并把失效 VP 交换到备用 VP。每个节点都维护着一个小规模本地数据库, 以管理上面连接的各条链路的资源利用信息, 恢复节点对掌握着每对工作 VP 和备用 VP。中间节点接收到一个“恢复”消息后, 查看是否有足够闲余容量来分配所需带宽, 如果有, 就给备用 VP 分配适当的带宽, 并将“恢复”消息发往下一个节点, 否则, 将“不可恢复”消息发往上一个节点。恢复节点的上行节点接收到“恢复”消息后, 立即将失效 VP 交换到备用 VP, 至此完成了一条工作 VP 的恢复。备用 VP 自愈算法的示意图见图 1。这里, 为了迅速性, 每个恢复消息用一个 OAM(Operation and Maintenance) 信元表示<sup>[4]</sup>。

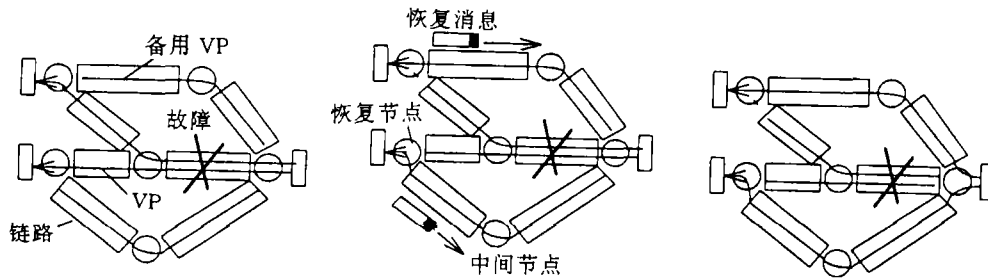


图 1 备用 VP 自愈算法

### 3 VP 交换机中自愈功能的实现方案

文献 [6] 中给出了 SDH 复用设备的类型和一般特征, DCP(Distributed Control Processing) 和 dB(Database) 的几个实现方案如图 2 所示, 这里假定每个 NE 包含 NEF (Network Element Function) 和 SEMF(Synchronous Equipment Management Function)。

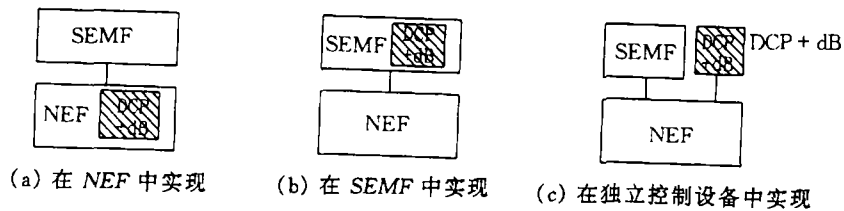


图 2 DCP+dB 在 NE 中的实现方案

方案 (a) 利用 NEF 硬件来实现 DCP+dB; 方案 (b) 和 (c) 用 SEMF 中或独立控制设备中软件过程来实现。由 (a)、(b)、(c) 三个 DCP+dB 实现方案得到自愈功能的三个实现方案如图 3。

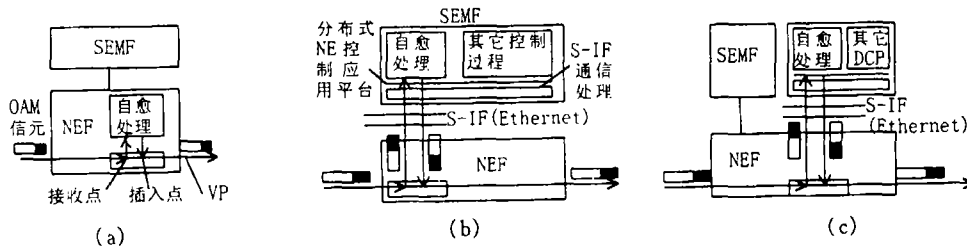


图 3 自愈功能的三个实现方案

注意，在 ATM 网中，NE 内部消息传输是利用 OAM 信元来实现的<sup>[7]</sup>。OAM 信元操纵功能安装在 NEF 中，负责 OAM 信元的接收和插入。接收点根据每个到达的 OAM 信元的参考域值来操纵该信元，操纵方式包括 Drop、Monitor、Delete 和 Through<sup>[4]</sup>。在自愈功能实现方案 (a) 中，接收点只接收自愈消息，因此对备用 VP 自愈算法，接收点仅接收不到 Through 操纵方式的信元；在方案 (b) 中，由于接收点不仅接收自愈消息，也接收其它用途的 OAM 信元，因此，全部操纵方式的信元都可能收到；在方案 (c) 中，接收点可以只接收自愈消息，也可以不仅接收自愈消息，而且接收其它用途的 OAM 信元。对前一种情况，接收点情况与方案 (a) 相同，对后一种情况，接收点情况与方案 (b) 相同。

### 4 排队模型

为了有效地分析 VPX 对备用 VP 算法自愈性能的影响，建立三个排队模型如图 4 所示。

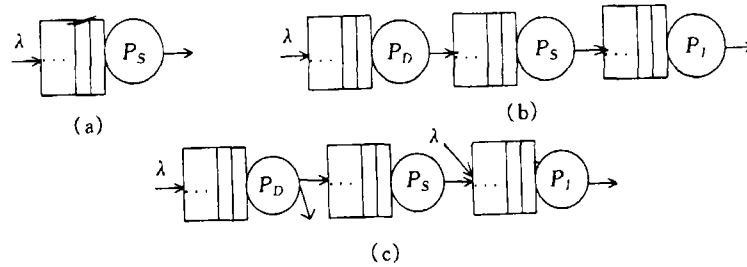


图 4 排队模型

自愈功能的实现方案 (a) 可以抽象为排队模型 (a)，方案 (b) 可以用模型 (c) 来描述，而方案 (c) 可以抽象为模型 (b)，也可以抽象为模型 (c)。详细说明如下。

排队模型 (a)：到达的 OAM 信元全部为自愈消息，到达过程为到达率  $\lambda$  的 Poisson 过程； $P_S$  为自愈处理，这里即是分配 / 释放带宽。

排队模型 (b)：到达的 OAM 信元全部为自愈消息，到达过程为到达率  $\lambda$  的 Poisson 过程； $P_D$  将到达的自愈消息从 NEF 经 S-IF 送入独立控制设备； $P_S$  对自愈消息进行自愈处理； $P_I$  将经过自愈处理的自愈消息从独立控制设备经 S-IF 送入 NEF 中的 OAM 插入点。

排队模型 (c)：到达的 OAM 信元中的一部分为自愈消息，另一部分用作其它的网络维护管理功能，每个 OAM 信元是自愈消息的概率为  $p$ ；OAM 信元到达过程为到达率  $\lambda$  的

Poisson 过程; 关于  $P_S$ 、 $P_D$ 、 $P_I$  的说明与排队模型 (b) 中相似, 只不过要用独立控制设备 /SEMF 替换独立控制设备, 这里不再赘述。注意, 经过  $P_D$  服务后的 OAM 信元仅有一部分 (即自愈消息) 需要  $P_S$  服务 (即自愈处理), 其它 OAM 信元则不必, 它们需要其它分布式处理或集中式处理; 在此排队模型中, 除了经过  $P_S$  服务的自愈消息进入  $P_I$  的等待队列之外, 还有其它用途的 OAM 信元进入此等待队列, 以便通过 S-IF 从独立控制设备 /SEMF 送入 NEF 中的插入点, 然后继续传输, 因此, 这里将其它用途的 OAM 信元到达  $P_I$  等待队列的过程设为到达率  $\lambda'$  的 Poisson 过程。

上述三个排队模型中,  $P_S$ 、 $P_D$ 、 $P_I$  都是不拒绝系统, 服务时间分别为  $T_S$ 、 $T_D$ 、 $T_I$  且实际上未必是固定的, 而是围绕某个值上下波动, 不过这种波动是微乎其微的, 所以可以设为常量。因为分配 / 释放带宽的时间非常短, 例如, 文献 [4] 试验结果为  $T_S=2\text{ms}$ , 因此,  $P_S$  一次服务一个“恢复”消息已经足够, 不需要批服务; 因为 OAM 信元穿过 S-IF 所需的时间较长, 例如, 文献 [4] 的试验结果为:  $T_D=18\text{ms}$ ,  $T_I=90\text{ms}$ , 因此,  $P_D$  和  $P_I$  需要批服务以增加吞吐量, 这里  $P_D$  和  $P_I$  的批服务规模应该相同, 设为  $K$ 。

由于流量的随机变化, VPX 并不一定都能成功地为备用 VP 分配到所需带宽, 但是, 只要传输链路中设计了足够的容量冗余, “恢复”消息一般都能成功地为备用 VP 分配到所需带宽, 所以排队模型的输入中考虑的自愈消息都是“恢复”消息。在所有模型中, 第一级服务的队列没有 Through 状态的 OAM 信元, 因为它们不需要排队等待进一步处理。

三个排队模型都可以用模型 (c) 来统一表示, 在模型 (c) 中取  $p=1$ ,  $\lambda'=0$ ,  $T_D=T_I=0$ , 即为模型 (a); 在模型 (c) 中, 取  $p=1$ ,  $\lambda'=0$ , 即为模型 (b)。

至此, 三个模型中共含有参数  $\lambda$ 、 $p$ 、 $\lambda'$ , 以及  $T_S$ 、 $T_D$ 、 $T_I$  和  $K$ 。

## 5 计算机模拟试验结果

### 5.1 计算机模拟试验的一些说明

建立了排队模型后, 研究 VPX 的自愈功能实现方案以及一些重要结构参数  $T_S$ 、 $T_D$ 、 $T_I$  和  $K$  对自愈性能的影响就比较方便了, 这里, 自愈性能是指在自愈时间里 VPX 一定能够恢复的失效 VP 的最大数目, 自愈时间是从 VPX 检测到故障告警开始到自愈过程终止所经过的时间, 一般要求不超过  $2\text{s}$ <sup>[8]</sup>。为节省篇幅, 以下进行的计算机模拟试验采用确定的  $T_S$ 、 $T_D$  和  $T_I$ , 根据文献 [4],  $T_S=2\text{ms}$ ,  $T_D=18\text{ms}$ ,  $T_I=90\text{ms}$ ; 自愈时间取为  $2\text{s}$ 。

在自愈过程的  $2\text{s}$  之内到达 VPX 的全部自愈消息设为  $\xi$ , 其间, VPX 一定能够恢复的失效 VP 的最大数目设为  $N_{p,\lambda',K}$ , 这正是我们要考察的自愈性能:

$$P\{\xi \text{ 被完全恢复} | \xi \leq N_{p,\lambda',K}\} \approx 1 \quad (\geq 0.998), \quad \text{对任意 } \lambda;$$

$$P\{\xi \text{ 被完全恢复} | \xi > N_{p,\lambda',K}\} < 0.998, \quad \text{当 } \lambda > \lambda_{p,\lambda',K} \text{ 时};$$

$\lambda_{p,\lambda',K}$  按如下方法确定。首先, 对每次取定的  $\lambda$ 、 $p$ 、 $\lambda'$  和  $K$ , 相应做 5000 次试验, 每次试验得到在  $2\text{s}$  之内到达 VPX 的自愈消息在其间被送到插入点的比例  $r$ , 以及最后一个自愈消息被处理完的时间  $l$ , 然后统计 5000 次模拟试验中  $r \geq 0.9$  的频率  $f_r$ , 以及  $l \leq 2.2\text{s}$  的频率  $f_l$ 。然后, 利用中心极限定理以 0.998 的精度估计  $\xi$  被完全恢复的概率, 从而确定

$\lambda_{p,\lambda',K}$  :

$$P\{\xi \text{ 被完全恢复}\} \approx 1 \quad (\geq 0.998), \quad \text{当 } \lambda = \lambda_{p,\lambda',K} \text{ 时};$$

$$P\{\xi \text{ 被完全恢复}\} < 0.998, \quad \text{当 } \lambda > \lambda_{p,\lambda',K} \text{ 时}.$$

可以验证:  $N_{p,\lambda',K} = 2000p\lambda_{p,\lambda',K} + 2.85\sqrt{2000p\lambda_{p,\lambda',K}}$  .

在每次计算机模拟试验中, 考虑到模型的近似性以及数据的随机性, 如果在自愈过程的 2s 之内到达 VPX 的自愈消息有 90% 以上在其间被送到插入点、而且全部在 2.2s 之内被送到插入点, 那么就认为 VPX 此次满足自愈时间要求, 作到了完全恢复。当然, 若对试验要求更严格, 也可以取在 2s 内到达 VPX 的自愈消息在其间被送到插入点的比例高于 90%、而且全部被送到插入点的时间少于 2.2s。

排队模型中采用的都是不拒绝系统, 似乎要求每级缓存器数量无限地大, 而实际上, 每级缓存器数量只需要足够大, 就能使信元丢失率任意小。这样,  $P_S$ 、 $P_D$ 、 $P_I$  的缓存器规模也是与 VPX 的性能有关的参数, 不能在试验前确定, 而只能在 5000 次试验后根据各个等待队列的最大长度  $B_S$ 、 $B_D$ 、 $B_I$  来决定。

### 5.2 对排队模型 (a) 的试验结果

因为模型 (a) 中  $p = 1, \lambda' = 0$  且不包含  $K$ , 所以实际上只有一个变量  $\lambda, \lambda_{p,\lambda',K}$  变成常数  $\lambda_{1,0,\cdot}, N_{p,\lambda',K}$  变成常数  $N_{1,0,\cdot}$ 。试验结果列于表 1。

表 1 模型 (a) 的试验结果

	$\lambda$														
	0.05	0.10	0.15	0.20	0.25	0.30	0.35	0.40	0.45	0.46	0.47	0.48	0.50	0.60	1.00
$f_r$	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.990	1	0.990	0.859	0	0
$f_l$	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.990	0.990	0.990	0.796	0	0
$p$	0.998+	0.998+	0.998+	0.998+	0.998+	0.998+	0.998+	0.998+	0.998+	0.993+	0.993+	0.993+	0.812+	0.02+	0.02+
$B_S$	2	4	6	8	9	14	18	31	82	-	-	-	-	-	-

从表 1 可见  $\lambda_{1,0,\cdot} = 0.45$ , 因此  $N_{1,0,\cdot} = 986$ , 即 VPX 能保证在自愈的 2s 之内完全处理的自愈消息个数最多为 986。所以, 为了保证完全恢复, 在每个 VPX 中针对每个故障设计的备用 VP 数目应该低于 986。即使每个 VPX 中针对每个故障设计的备用 VP 数目低于 986, 若自愈处理的缓存器容量不够大, 也可能因为丢失自愈消息而不能保证完全恢复。从表 1 可见, 只要自愈处理的缓存器规模比 82 个信元大就可以了。

### 5.3 对排队模型 (b) 的试验结果

因为模型 (b) 中  $p = 1$  且  $\lambda' = 0$ , 实际上只有两个变量  $\lambda$  和  $K$ , 所以  $\lambda_{p,\lambda',K}$  变成  $\lambda_{1,0,K}$ ,  $N_{p,\lambda',K}$  变成  $N_{1,0,K}$ 。  $K$  成了 VPX 中影响自愈性能的唯一参数。试验结果见表 2。

表 2 模型 (b) 的试验结果

	$\lambda$														
	0.05	0.13	0.14	0.15	0.20	0.25	0.30	0.35	0.40	0.41	0.42	0.43	0.50	0.60	1.00
$f_r$	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.980	0.995	0.995	0	0	0
$f_l$	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.980	0.995	0.945	0	0	0
$p$	0.998+	0.998+	0.998+	0.998+	0.998+	0.998+	0.998+	0.998+	0.998+	0.985+	0.997+	0.954+	0.02+	0.02+	0.02+
$K$	10+	16+	18+	20+	25+	30+	40+	45+	49+	-	-	-	-	-	-
$B_D$	6	10	11	11	14	15	17	20	24	-	-	-	-	-	-
$B_S$	5	9	9	10	13	14	18	27	36	-	-	-	-	-	-
$B_I$	12	22	23	27	36	40	45	45	56	-	-	-	-	-	-

$K \rightarrow \infty$ : 显然, 此时 VPX 满足最好的自愈性能,  $\lambda_{1,0,K}$  达到最大值  $\lambda_{1,0,\infty} = 0.4$ 。于是用与第 5.2 节相似的分析方法可知, VPX 能保证在自愈的 2s 之内完全处理的自愈消息个数最多为 881, 而且为了可靠的恢复,  $P_S$ 、 $P_D$ 、 $P_I$  的缓存器容量应分别适当大于 36、24、56 个信元。实际中  $K$  不可能为无穷大, 当  $K$  足够大时,  $\lambda_{1,0,K}$  就可以达到最大值  $\lambda_{1,0,\infty}$ 。由表 2 可见: 只要 VPX 中  $K \geq 49$  就可以了。

$K = 16$ : 由于技术水平的限制,  $K$  可达到 16, 而非任意大。此时  $\lambda_{p,\lambda',K}$  是常数  $\lambda_{1,0,16}$ , 由表 2 可见:  $\lambda_{1,0,16} = 0.13$ 。于是, VPX 保证在 2s 之内完全处理的自愈消息个数最多为 306, 为了不丢失自愈消息,  $P_S$ 、 $P_D$ 、 $P_I$  的缓存器容量应分别比 9、10、22 个信元适当地大。

#### 5.4 对排队模型 (c) 的试验结果

排队模型 (c) 中有四个变量  $\lambda$ 、 $p$ 、 $\lambda'$  和  $K$ 。

$K \rightarrow \infty$ : 显然, 此时对每个  $p$ , VPX 都满足最好的自愈性能,  $\lambda_{p,\lambda',K}$  达到最大值  $\lambda_{p,\infty}$  (与  $\lambda'$  无关)。模拟试验显示:  $p\lambda_{p,\infty} \approx 0.4$ 。于是,  $N_{p,\infty} = 881$ , 即 VPX 保证在 2s 之内完全处理的自愈消息个数最多为 881。

实际中  $K$  不可能为无穷大, 对每个  $p$  和  $\lambda'$ , 当  $K$  足够大时, 就可以达到最大值  $\lambda_{1,0,\infty}$ 。图 5 给出了  $K$  的下限。由图 5 可见: 若对  $\lambda'$  不加以限制, 则  $K \rightarrow \infty$ , 而实际中  $\lambda'$  是可以控制得比较小的, 例如  $\lambda' \leq 1$ , 此时只要  $K \geq 145$  就可以了。

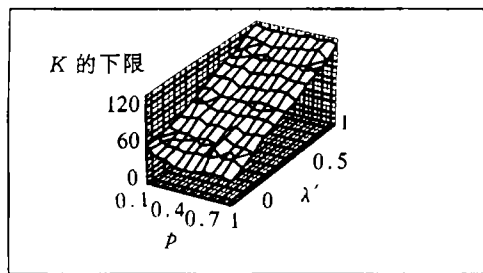


图 5  $K$  的下限

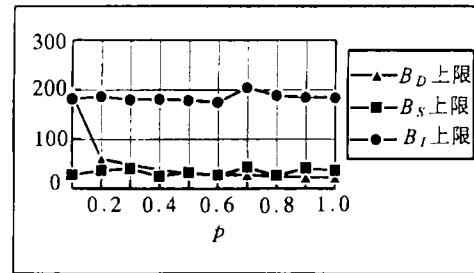
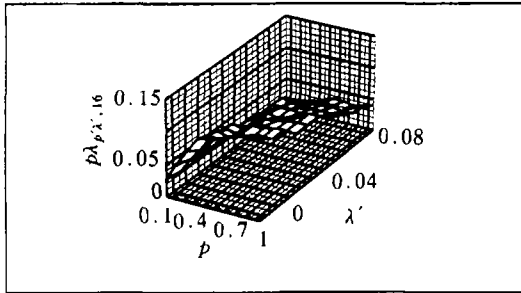
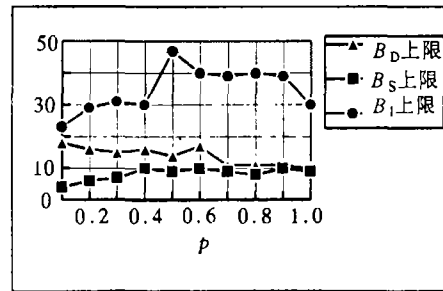


图 6  $B_S$ 、 $B_D$ 、 $B_I$  的上限

当控制  $\lambda' \leq 1$ 、取  $K \geq 145$ 、且针对每个故障设计的备用 VP 数目低于 881 时, 图 6 给出了此时对每个  $p$  所得的  $B_S$ 、 $B_D$ 、 $B_I$  上限。从图 6 可见: 为保证可靠恢复,  $P_S$ 、 $P_D$ 、 $P_I$  的缓存器容量应分别比 44、192、204 个信元适当地大。

$K = 16$ : 此时  $\lambda_{r,\lambda',K}$  变成了  $\lambda_{p,\lambda,16}$ 。图 7 给出了  $p\lambda_{p,\lambda,16}$  的模拟试验结果。由图 7 可知, 如果不对  $p$  和  $\lambda'$  进行适当的控制,  $p\lambda_{p,\lambda,16}$  可能取很小的值, 使  $N_{p,\lambda,16}$  小于为故障设计的备用 VP 数目, 根本不可能作完全恢复。实际中  $\lambda'$  可以控制得比较小, 例如  $\lambda' \leq 0.1$ ,  $p$  可以控制得比较大, 例如  $p \geq 0.4$ 。这样,  $p\lambda_{p,\lambda,16} \geq 0.04$ ,  $N_{p,\lambda,16} \geq 106$ 。

图 7  $p\lambda_{p,\lambda',16}$ 图 8  $B_S$ 、 $B_D$ 、 $B_I$  的上限

当控制  $p \geq 0.4$ 、 $\lambda' \leq 0.1$ 、且每个 VPX 中针对每个故障设计的备用 VP 数目低于 106 时, 图 8 给出了此时对每个  $p$  所得的  $B_S$ 、 $B_D$ 、 $B_I$  上限。从图 8 可见: 为保证可靠恢复,  $P_S$ 、 $P_D$ 、 $P_I$  的缓存器容量应分别比 10、18、47 个信元适当地大。

## 6 结 语

对备用 VP 算法, 在自愈过程的 2s 内, 模型 (a) 可以保证恢复的最大失效 VP 数目为 986, 比模型 (b) 和 (c) 多 105。为保证完全恢复的失效 VP 数目达到最大, 模型 (c) 中需要的最小  $K$  为 49; 模型 (b) 需要的最小  $K$  与  $\lambda'$  有关, 当  $\lambda'$  很大时趋于无限, 当  $\lambda'$  很小时才降低至 49。

实际中  $K$  不能任意大。当  $K = 16$  时, 在 2s 内可以保证完全恢复的最大失效 VP 数目将减少, 在模型 (b) 中为 306, 在模型 (c) 中却与  $\lambda'$  和  $p$  有关, 当  $\lambda'$  较大或  $p$  较小时, 可以趋于 0, 当  $\lambda'$  较小且  $p$  较大时, 才可上升到 306。

模型 (a) 有最好的自愈性能, 模型 (c) 的自愈性能最差。模型 (b) 只有当  $T_S$ 、 $T_D$ 、 $T_I$  更短, 而不是  $K$  更大时, 自愈性能可以进一步提高, 以至于接近模型 (a)。模型 (c) 中只有当  $\lambda' \approx 0$  和  $p \approx 1$  时, 亦即当尽量减少自愈过程中其它用途的 OAM 信元的产生和传送, 自愈性能可以接近模型 (b)。

**致谢** 本文作者衷心感谢导师周炯磐先生的鼓励和指导!

## 参 考 文 献

- [1] Grover W D. The self-healing network. Proc. Globecom'87, Tokyo, Japan: 1987, 1090-1095.
- [2] Fujii H, *et al.* Restoration message transfer mechanism and restoration characteristics of double-search self-healing ATM network. IEEE J of SAC, 1994, SAC-12(1): 149-158.
- [3] Anderson J, *et al.* Fast restoration of ATM networks. IEEE J of SAC, 1994 SAC-12(1): 128-138.
- [4] Kawamura R, *et al.* Implementation of self-healing function in ATM networks based on virtual path concept. INFOCOM'95, Boston, MA: 1995, 303-311.
- [5] ITU-T Recommendation I.150. B-ISDN Asynchronous Transfer Mode Functional Characteristics, 1992.
- [6] ITU-T Recommendation G.782. Types and General Characteristics of Synchronous Digital Hierarchy (SDH) Multiplexing Equipment, 1990.
- [7] ITU-T Recommendation I.610. B-ISDN Operation and Maintenance Principles and Functions, 1992.

- [8] Nederlof L, *et al.* End-to-end survivable broadband networks. *IEEE Commun. Mag.*, 1995, 33(9): 63-70.

ANALYSIS OF THE EFFECT OF VP SWITCHES ON  
THE PERFORMANCE OF BACKUP-VP ALGORITHM IN  
ATM SELFHEALING NETWORKS

Tang Jian    Lei Zhenming\*

(*National Digital Switching Center, Zhengzhou 450002*)

*\*(Dept. of Information Eng., Beijing University of Posts and Telecomm., Beijing 100876)*

**Abstract** The queuing models of three typical implementation schemes of selfhealing function in VP switches for backup-VP selfhealing algorithm are given. Computer simulations are made, and detailed analyses of the effect of implementation schemes of selfhealing function and architecture parameters in VP switches on selfhealing performance are presented. Analytic results are helpful to choose the reasonable implementation scheme of selfhealing function, architecture parameters and number of backup-VP in VP switches for the best selfhealing performance.

**Key words** ATM network, VP switch, Selfhealing algorithm

唐 健: 女, 1965 年生, 博士, 主要从事通信网理论和 ATM 交换机的研究, 已在国内外发表学术论文 20 余篇.

雷振明: 男, 教授, 博士生导师, 北京邮电大学 ATM 研究与开发中心主任, 目前正领导着国家 863 课题——ATM 交叉连接机的研制开发工作.